

ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ
ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

УДК 535.8

ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ АКУСТООПТИЧЕСКИЙ ФИЛЬТР
ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ДИАПАЗОНОВ 450...900 нм И 900...1700 нм¹

© 2020 г. В. И. Батшев^{a, b, *}, А. С. Мачихин^a, А. Б. Козлов^{a, c}, С. В. Боритко^{a, d},
М. О. Шарикова^{a, b}, А. В. Карандин^a, В. Э. Пожар^{a, b}, В. А. Ломонов^e

^aНаучно-технологический центр уникального приборостроения РАН,
ул. Бутлерова, 15, Москва, 117342 Российская Федерация

^bМГТУ им. Н.Э. Баумана,
ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1, Москва, 105005 Российская Федерация

^cНИИ “Полюс” им. М.Ф. Стельмаха”,
ул. Введенского, 3, корп. 1, Москва, 117342 Российская Федерация

^dМосковский физико-технический институт,
Институтский пер., 9, Долгопрудный Московской обл., 141701 Российская Федерация

^eФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН,
Ленинский просп., 59, Москва, 119333 Российская Федерация

*E-mail: batshev@bmstu.ru

Поступила в редакцию 17.12.2019 г.

После доработки 10.02.2020 г.

Принята к публикации 12.02.2020 г.

Изучена проблема создания акустооптического перестраиваемого фильтра, позволяющего получать спектральные изображения высокого качества как в видимом, так и ближнем инфракрасном диапазонах. На основе анализа широкоапертурной неколлинеарной геометрии акустооптической дифракции в парателлурите определена конфигурация акустооптической ячейки, оптимальная с точки зрения минимизации хроматического сдвига, подходящая для обоих диапазонов. Изготовлены две идентичные ячейки, согласованные на диапазоны 450...900 и 900...1700 нм. Экспериментальная проверка результатов оптического моделирования показала, что в пределах всего диапазона 450...1700 нм рассчитанная схема акустооптических фильтров обеспечивает получение спектральных изображений высокого качества.

DOI: 10.31857/S0033849420070025

ВВЕДЕНИЕ

Приборы для качественного и количественного исследования спектрального состава света, излучаемого, поглощаемого, отражаемого или рассеиваемого объектом, позволяют судить о его свойствах, химическом составе и характере физических процессов, связанных с излучением или взаимодействием света с веществом объекта. Тенденцией современной спектроскопии является создание гипер- и видеоспектрометров – оптико-электронных приборов, предназначенных для регистрации и анализа одновременно пространственных и спектральных характеристик объекта. Данные приборы эффективно используются, например, для визуализации биологических тканей и структуры биообъектов различными методами, для дистан-

ционного зондирования, в пищевой промышленности и сельском хозяйстве, а также для решения многих других задач [1–3]. Для получения таких изображений могут использоваться разные подходы и аппаратура, обладающие своими особенностями и преимуществами, но наиболее универсальным является метод, основанный на использовании перестраиваемых оптических фильтров. При этом спектрометр последовательно настраивается на те интервалы спектра излучения, где наиболее интенсивно проявляются физические, химические и другие свойства исследуемого объекта и отсутствуют фоновые помехи, что позволяет получить изображение, контрастно отображающее именно эти свойства. Такой подход (spectral imaging) позволяет увеличить скорость сбора пространственно-спектральных данных, оптимизировать процедуры их анализа и создать принципиально новые адаптивные методы визуализации объектов. Среди электронно-перестраиваемых оптических фильтров наибольшее распространение

¹ Работа доложена на Третьей Международной молодежной конференции “Информационные технологии и технологии коммуникации: современные достижения” (Астрахань, 1–5 октября 2019 г.).

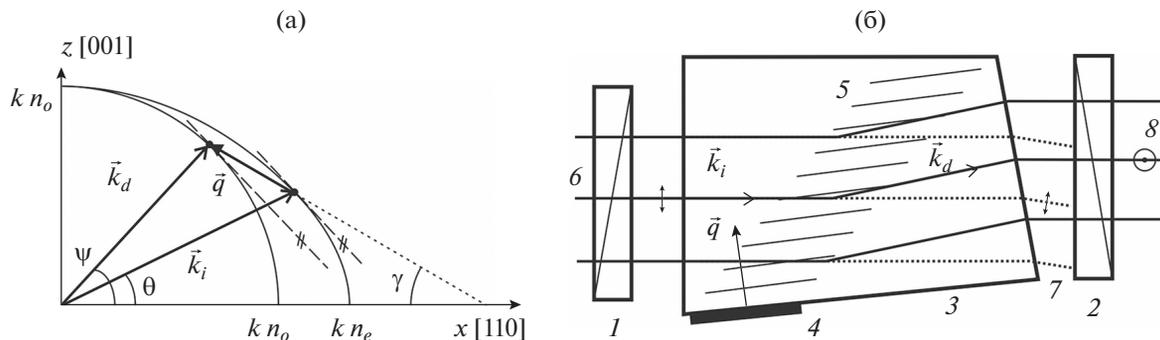


Рис. 1. Волновая диаграмма (а) и схема (б) широкоапертурного АО-фильтра: 1, 2 – входной и выходной скрещенные поляризаторы; 3 – АО-ячейка; 4 – пьезопреобразователь; 5 – акустический пучок; 6, 7 и 8 – световые пучки, падающий, недифрагированный и прошедший соответственно.

получили акустооптические (АО) монохроматоры, обеспечивающие во многих случаях оптимальное по сравнению с другими фильтрами (жидкокристаллическими, Фабри-Перо и др.) сочетание пространственного и спектрального разрешения, светосилы, диапазона и скорости перестройки [4, 5]. Поэтому они используются для решения различных задач современной спектроскопии с пространственным разрешением: дистанционного зондирования и спектральной съемки, астрофизических исследований, биомедицины [6–8].

Одним из факторов, ограничивающих область применения АО-видеоспектрометров, является спектральный диапазон перестройки, ограниченный в силу технологических факторов, как правило, одной октавой, например, 450...900, 900...1800 нм и пр. Кроме того, наличие хроматического сдвига изображения, вызванного АО-взаимодействием, приводит к необходимости применения различных технических методов для минимизации сдвига за счет подбора оптимальной геометрии АО-взаимодействия, изменения формы кристалла, использования дополнительных компонентов-корректоров [9, 10]. По этим и иным причинам АО-фильтры изображений различных диапазонов имеют различные характеристики.

В данной работе описана геометрия и конфигурация акустооптического перестраиваемого фильтра, позволяющего получать спектральные изображения высокого качества как в видимом 450...900 нм, так и ближнем ИК-диапазоне 900...1700 нм, которые соответствуют диапазонам чувствительности двух наиболее распространенных матричных приемников излучения – на технологии КМОП и на структурах InGaAs.

1. РАСЧЕТ АКУСТООПТИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ

Принцип действия перестраиваемого АО-фильтра основан на создании в среде динамиче-

ской объемной дифракционной решетки с помощью ультразвука, селективная брэгговская дифракция на которой используется для выделения из светового пучка с широким спектром составляющей с заданной длиной волны λ . Анизотропная дифракция светового пучка на фазовой дифракционной решетке, образованной в кристалле распространяющейся в АО-ячейке акустической волной, имеет две особенности, которые используются для селекции излучения. Первая – “резонансный” характер спектральной зависимости, при котором длина волны излучения λ , попадающего в резонанс (синхронизм), определяется периодом решетки, а значит, частотой звука f . Вторая – изменение направления поляризации и направления распространения дифрагированной световой волны, что позволяет выделять ее поляризаторами. На рис. 1 представлена схема и волновая диаграмма классического неколлинеарного АО-фильтра. Выделенная входным поляризатором поляризационная спектральная компонента света \vec{k}_i , удовлетворяющая условию Брэгга для волновых векторов $\vec{k}_i + \vec{q} = \vec{k}_d$, дифрагирует на акустической волне \vec{q} в АО-ячейке, что определяет связь f и λ

$$f(\lambda) = \frac{V}{\lambda} n_o(\lambda) \times \left(\xi(\theta, \lambda) \cos(\theta - \gamma) - \sqrt{1 - \xi^2(\lambda) \sin^2(\theta - \gamma)} \right),$$

где

$$\xi(\theta) = n_e(\theta)/n_o = n_e / \sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta + n_e^2 \sin^2 \theta} \approx 1 + (\Delta n/n_e) \cos^2 \theta,$$

n_o и n_e – показатели преломления материала кристалла для необыкновенно и обыкновенно поляризованных волн, $\Delta n = n_e - n_o$; γ и θ – углы рас-

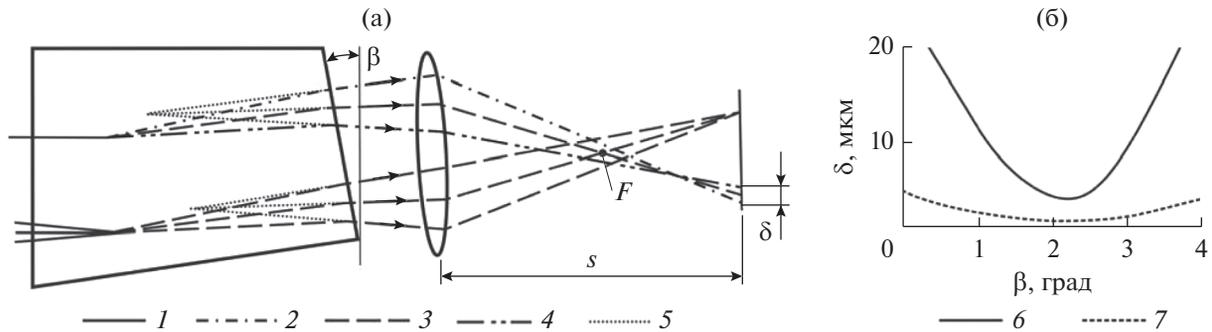


Рис. 2. К расчету угла наклона β выходной грани АО-ячейки: а) схема хода лучей; б) зависимость поперечного хроматического сдвига $\delta(\beta)$, 1 – падающее излучение; 2, 3 и 4 – излучение, дифрагировавшее на длинах волн λ_1 , λ_2 и λ_3 соответственно; 5 – продолжения преломленных лучей; 6 и 7 – графики, построенные для диапазонов 0.45...0.9 мкм и 0.9...1.7 мкм соответственно.

пространства звука и падающего света в плоскости дифракции (XZ),

$$V = \sqrt{V_z^2 \cos^2 \gamma + V_x^2 \sin^2 \gamma},$$

V_z и V_x – скорости распространения звука в направлении γ и вдоль осей Z и X.

Анизотропная дифракция сопровождается изменением ориентации линейной поляризации излучения на ортогональную и отклонением направления его распространения на угол $\psi - \theta$. В случае широкоапертурного АО-взаимодействия $e \rightarrow o$ направление распространения дифрагированного излучения $\psi = \arctg(\xi_0^2 \tan \theta)$ определяется величиной двулучепреломления $\xi_0 = n_e/n_o$ кристалла. Недифрагированное излучение задерживается выходным поляризатором. Входную грань АО-ячейки ориентируют перпендикулярно падающему световому пучку \vec{k}_d , а выходную так, чтобы частично скомпенсировать спектральный дрейф изображения [9].

Основными видами aberrаций, вызываемых АО-фильтром, являются дисторсия, хроматизм продольного положения и поперечный хроматический сдвиг изображения [9–11]. В конфокальной схеме АО-фильтрации (рис. 2а) дисторсия отсутствует [11, 12]. Хроматизм положения, проявляющийся в виде дефокусировки изображений, построенных на разных длинах волн, зависит лишь от длины кристалла и может быть скомпенсирован другими оптическими элементами. Хроматический поперечный сдвиг изображения невозможно скомпенсировать осесимметричными элементами, поэтому его следует минимизировать на этапе расчета параметров АО-фильтра за счет правильного выбора угла наклона выходной грани АО-кристалла β [9, 11].

На рис. 2а проиллюстрирована причина возникновения хроматического сдвига. Показан ход широкого пучка лучей с длиной волны λ_2 через

нижнюю часть АО-кристалла; эти лучи фокусируются в плоскости изображения на расстоянии s от объектива, который представлен в виде идеальной тонкой линзы. В верхней части кристалла для разных длин волн показан ход лишь главного луча. В зависимости от параметров подаваемого ультразвука он может дифрагировать на одной из длин волн в пределах рабочего диапазона АО-фильтра. Вследствие дисперсии материала АО-кристалла два дифрагированных луча на длинах волн λ_1 и λ_3 ($\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$) после преломления на его выходной грани пересекаются не в плоскости изображения, что и вызывает хроматический сдвиг изображения величиной δ .

На рис. 2б представлены графики зависимости хроматического сдвига δ от угла наклона выходной грани β , полученные в результате моделирования АО-фильтра в программе Zemax [11]. Графики получены для выбранных параметров АО-ячейки (материал TeO_2 , $\gamma = 7^\circ$, режим дифракции $e \rightarrow o$, длина кристалла 25 мм, световая апертура $10 \times 8 \text{ мм}^2$) и при фокусном расстоянии выходного объектива 35 мм. Два графика соответствуют двум спектральным диапазонам: видимому 450...900 нм и ближнему ИК 900...1700 нм. Из графиков видно, что в ИК-диапазоне хроматический сдвиг существенно ниже, что объясняется меньшей дисперсией материала в этой области. Кроме того, минимальное значение хроматического сдвига δ_{\min} в обоих диапазонах наблюдается при примерно равных значениях угла $\beta \approx 2^\circ$. В видимом диапазоне $\delta_{\min} \approx 4 \text{ мкм}$, а в ИК – $\delta_{\min} \approx 1.5 \text{ мкм}$.

Важным техническим вопросом является устранение световых потерь, обусловленных отражением излучения от рабочих оптических поверхностей. Этот вопрос решается за счет нанесения на эти поверхности просветляющих покрытий. Однако для АО-ячейки, работающей в столь широком спектральном диапазоне, изготовление таких покрытий является сложной техноло-

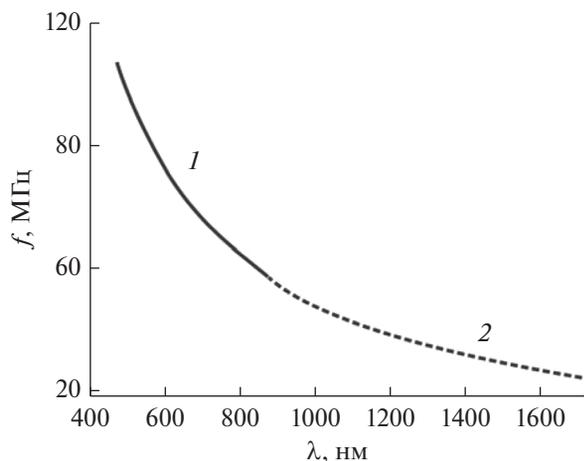


Рис. 3. Перестроенная кривая $f(\lambda)$ АО-фильтра видимого (1) и ближнего ИК- (2) диапазонов.

гической задачей. Альтернативным подходом является, например, нанесение разных покрытий на поверхности АО-ячейки: на входную грань наносится покрытие, просветляющее в видимом диапазоне, на выходную – в ближнем ИК. По расчетам суммарные потери на отражение от обеих граней АО-ячейки в этом случае не превыдают 10% в пределах диапазона 0.45...1.7 мкм.

2. РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ

Для проверки результатов расчета и моделирования были изготовлены две идентичные АО-ячейки из TeO_2 , реализующие широкоапертурное АО-взаимодействие, с углом среза $\gamma = 7^\circ$. Для обеспечения перестраиваемой фильтрации в диапазонах длин волн 450...900 нм и 900...1700 нм данные ячейки были согласованы в диапазонах частот ультразвука 65...10 и 30...60 МГц соответ-

ственно. Перестроенные кривые $f(\lambda) \approx V\Delta n/\lambda$ показаны на рис. 3. Длина пьезопреобразователя в обоих случаях составляла 12 мм, диаметр входного зрачка – 9 мм, угловое поле – $3^\circ \times 3^\circ$.

Для иллюстрации спектрального разрешения изготовленных фильтров на рис. 4 приведены функции пропускания $T(\lambda)$, измеренные с помощью дифракционного спектрометра высокого разрешения на различных длинах волн λ . Видно, что вид функций пропускания совпадает с теоретическим видом, описываемым функцией

$$\text{sinc}^2[(v - v_f)/\Delta v],$$

где $v_f \sim f$, $\Delta v \approx 1/L_{\text{вз}}$, $L_{\text{вз}}$ – длина взаимодействия света со звуковым пучком [13]. Полоса пропускания составила $\Delta v \approx 70 \text{ см}^{-1}$ в видимом диапазоне и $\Delta v \approx 150 \text{ см}^{-1}$ в ИК-области. В единицах длин волн полоса пропускания АО-фильтра изменяется квадратично $\Delta\lambda \sim \lambda^2$ [14].

Конфокальная схема [12] АО-видеоспектрометра, содержащего рассчитанный АО-фильтр, представлена на рис. 5. На вход системы поступают параллельные пучки лучей от объекта. Объектив 2 строит изображение внутри АО-кристалла. В передней фокальной плоскости объектива 2 расположена диафрагма 1, что обеспечивает телецентрический ход лучей через АО-фильтр и, как следствие, постоянный по полю зрения коэффициент пропускания. Скращенные поляризаторы 3 и 5 не позволяют пройти через АО-фильтр неотфильтрованному излучению. Объектив 6 формирует из расходящегося пучка лучей параллельный пучок, который далее спектральным светоделительным кубиком 7 делится на два канала: видимый и ИК. В видимом канале объектив 10 строит изображение на КМОП-приемнике излучения 11, а в ИК объектив 8 – на InGaAs-приемнике 9. Схема предназначена для АО-фильтра, в котором

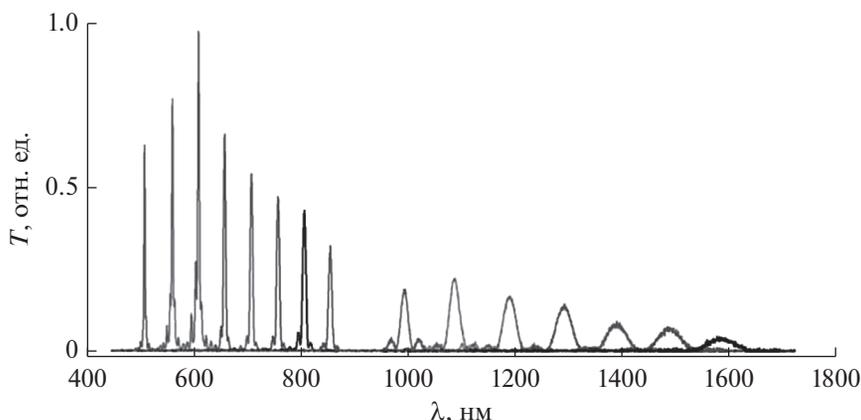


Рис. 4. Функция пропускания $T(\lambda)$ АО-фильтра в видимом и ближнем ИК-диапазонах.

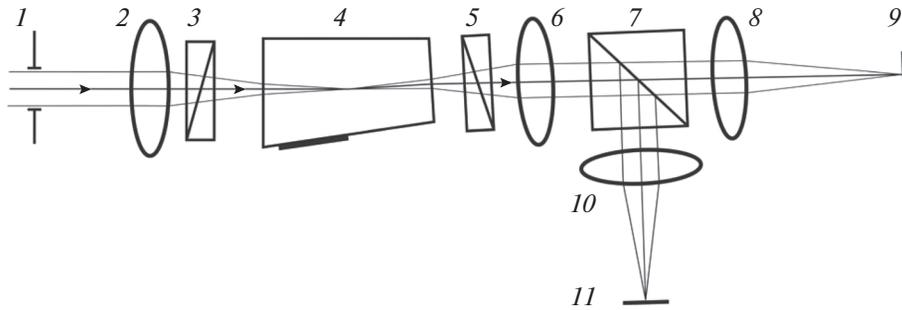


Рис. 5. Схема двухдиапазонного АО-видеоспектрометра.

сформированы два спектральных канала. Для одноканального АО-фильтра делитель 7 не нужен.

В качестве приемника излучения в видимом диапазоне была использована КМОП-матрица Sony IMX273LLR с разрешением 1440×1080 пикселей размерами 5.0×3.8 мм². Учитывая световой размер АО-кристалла 10×8 мм², фокусные расстояния объективов 6 и 10 были выбраны равными 35 и 50 мм соответственно. В этом случае размер промежуточного изображения, образованного внутри АО-фильтра, равен 5.4×7.1 мм², что позволяет избежать виньетирования крайних пучков лучей.

Для удобства входной объектив 2 был эквивалентен объективу 6, что обеспечило и небольшие габариты системы. Поле зрения в пространстве предметов этой системы составило $9^\circ \times 12^\circ$. Диаметр входной диафрагмы 1 равен 3 мм, что определяется апертурой АО-фильтра, которая составляла 4° . Диаметры входных зрачков объективов 8 и 10 составили 3 мм.

В ИК-диапазоне был использован InGaAs-сенсор 7.68×9.6 мм² с разрешением 320×256 пикселей и размером пиксела 30×30 мкм². Для обеспечения одинаковых полей зрения в видимом и ИК-каналах целесообразно использовать объектив с фокусным расстоянием 25 мм. Рисунок 6 иллюстрирует вносимый АО-фильтром хроматизм положения, т.е. зависимость рабочего отрезка s (см. рис. 2а) от длины волны для видимого и ИК-диапазонов.

Расчет показал, что в диапазоне 450...900 нм хроматический сдвиг положения составляет 740 мкм, а в диапазоне 900...1700 нм—200 мкм. В связи с этим для упрощения оптической схемы в качестве объективов 2 и 6 были использованы двухлинзовые склеенные объективы, исправляющие хроматизм положения в видимом диапазоне, а в качестве объектива 10— стандартный объектив для видимого диапазона с фиксированным фокусным расстоянием 50 мм и относительным отверстием 1 : 12, что является простым и эффективным решением. В диапазоне 900...1700 нм

остаточный хроматизм положения был исправлен за счет использования специального объектива 8 с фокусным расстоянием 25 мм и относительным отверстием 1 : 8.

3. АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ

Для экспериментального исследования принципиально достижимого качества изображений, формируемых разработанным видеоспектрометром, были созданы два макета: на видимый и ИК-диапазоны. На данной стадии работы проведение исследований сразу на двухканальном фильтре нецелесообразно, так как сложности, связанные с возбуждением двух пучков, могли бы негативно повлиять на результат. В макетах использованы стандартные объективы с фокусными расстояниями, представленными в разд. 2, что позволило обеспечить одинаковые поля зрения в обоих макетах. Входной объектив фокусировался таким образом, чтобы получить резкое изображение объекта, расположенного на конечном расстоянии от макета.

На рис. 7 представлены фрагменты зарегистрированных изображений цветного объекта (верхний ряд) и стандартной штриховой миры

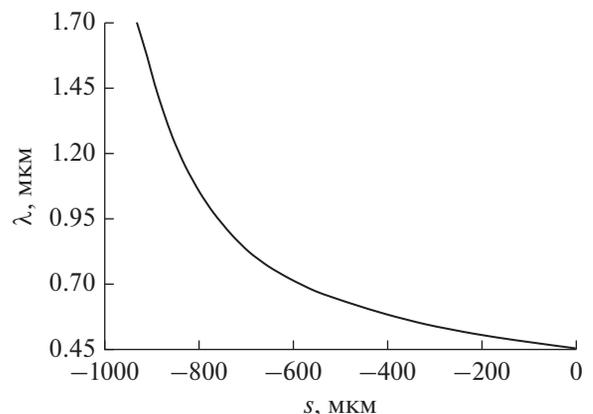


Рис. 6. Зависимость рабочего отрезка s от длины волны.

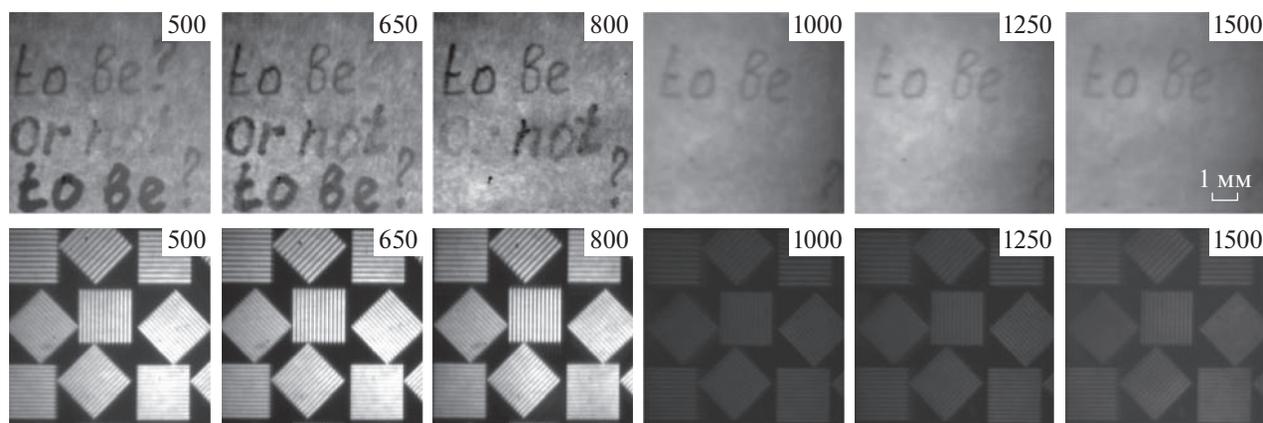


Рис. 7. Примеры зарегистрированных спектральных изображений: первая строка надписи (верхний ряд) выполнена карандашом, а нижняя – маркером.

№ 5 (нижний ряд). Анализ результатов показал высокое пространственное разрешение изображений во всем спектральном диапазоне. Измеренная пространственная разрешающая способность на длине волны 650 нм составила около 40 мм^{-1} , а на длине волны 1250 нм – около 15 мм^{-1} , притом что расчетные значения составляют 65 и 20 мм^{-1} . Отличия экспериментальных данных от расчетных обусловлены в первую очередь тем, что при макетировании использованы стандартные объективы, не рассчитанные для компенсации искажений АО-фильтра. Однако даже при этом удалось получить высокое разрешение изображения.

Кроме того, наблюдается полное отсутствие искажений пропорций объекта (дисторсии), что обусловлено применением конфокальной схемой АО-фильтрации. Незначительный поперечный сдвиг изображения δ при перестройке по длине волны составляет около 20 мкм в диапазоне 450...900 нм и не более 1 пикселя ($\delta \leq 30 \text{ мкм}$) в диапазоне 900...1700 нм. Следует отметить, что эти значения заметно уступают расчетным, представленным в разд. 2, что вызвано, вероятно, погрешностями изготовления кристаллических АО-ячеек и погрешностями юстировки макетов. Но столь небольшие смещения не существенны и могут быть легко устранены за счет пространственной калибровки видеоспектрометра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной целью настоящей работы являлось создание АО-фильтра, обеспечивающего высокое качество изображений для работы с матричными приемниками видимого и ближнего ИК-диапазона. Показано, что на оба диапазона такой АО-фильтр можно создать по одной схеме, с одинаковой формой АО-ячейки, используя одинаковую гео-

метрию дифракции. Это, в частности, дает возможность создавать двухдиапазонные АО-фильтры, обеспечивающие высокое качество изображения и высокую эффективность АО-дифракции в обоих спектральных диапазонах.

Корректный выбор геометрии АО-взаимодействия и угла среза грани кристалла обеспечивает компенсацию хроматического сдвига изображения и исключает необходимость перефокусировки при перестройке по спектру. Следует отметить, что величина найденного угла скоса выходной грани, обеспечивающего высокое качество изображения, отличается от величин, которые были использованы другими авторами [9, 15]. При этом эта величина может быть оптимизирована с использованием рассчитанных кривых, характеризующих величину основных аберраций.

Полученные результаты дают возможность унифицировать конструкцию и схему АО-фильтров для наиболее востребованных диапазонов: видимого (450...900 нм) и ближнего ИК (900...1700 нм), что важно для оптимизации процесса создания акустооптических гипер- и видеоспектрометров.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-29-20095). В части технологии изготовления АО-ячеек работа проводилась в рамках госзадания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shaw G.A., Burke H.K. // Lincoln Laboratory J. 2003. V. 14. № 1. P. 3.

2. *Chang C.* Hyperspectral imaging: Techniques for spectral detection and classification. N.Y.: Springer Science & Business Media, 2003.
3. *Sun D.-W.* Hyperspectral Imaging for Food Quality Analysis and Control. San Diego: Acad. Press/Elsevier, 2010.
4. *Hagen N., Kudenov M.W.* // Opt. Eng. 2013. V. 52. № 9. P. 090901.
5. *Li Q., He X., Wang Y., Liu H., Xu D., Guo F.* // J. Biomed. Opt. 2013. V. 18. № 10. P. 100901.
6. *Glenar D.A., Hillman J.J., Saif B., Bergstrakh J.* // Appl. Opt. 1994. V. 33. № 31. P. 7412.
7. *Korablev O.I., Belyaev D.A., Dobrolenskiy Yu.S. et al.* // Appl. Opt. 2018. V. 57. № 10. P. C103.
8. *Lu G., Fei B.* // J. Biomed. Opt. 2014. V. 19. № 1. P. 010901.
9. *Епихин В.М., Калинин Ю.К.* // ЖТФ. 1989. Т. 59. № 2. С. 160.
10. *Ryu S.Y., You J.-W., Kwak Y., Kim S.* // Opt. Express. 2008. V. 16. P. 17138.
11. *Machikhin A., Batshev V., Pozhar V.* // J. Opt. Soc. Amer. A. 2017. V. 34. № 7. P. 1109.
12. *Suhre D.R., Denes L.J., Gupta N.* // Appl. Opt. 2004. V. 43. P. 1255.
13. *Пожар В.Э., Пустовойт В.И.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 10. С. 1375.
14. *Goutzulis A., Rape D.* Design and fabrication of acousto-optic devices. N.Y.: Dekker, 1994.
15. *Gupta N., Voloshinov V.* // Appl. Opt. 2007. V. 46. № 7. P. 1081.